

А.Н. Баранов

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ**

Красноярск 2012

Министерство образования и науки РФ

**ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический
университет»**

А.Н. Баранов

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ**

Утверждено редакционно-издательским советом в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся по
направлению 6563300 Технология лесозаготовительных и
деревообрабатывающих производств специальности 2500401
Лесоинженерное дело очной и заочной формы обучения

Красноярск 2012

УДК: 630*377

Теоретические основы проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных дорог : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 6563300 Технология лесозаготовительных деревообрабатывающих производств специальности 250401 Лесоинженерное дело очной и заочной формы обучения / А. Н. Баранов ; Сиб. гос. технол. ун-т. – Красноярск : СибГТУ, 2012. – 169 с.

Рецензенты: проф., д.т.н. каф. ИВР Гайденок Н.Д.
директор ОАО «ПКТБ Лесное», Шмелев В.В.

Рассматриваются вопросы теории: проектирования плана и продольного профиля лесовозных дорог, обоснования основных проектных параметров и норм проектирования лесных дорог, размещения лесных дорог в комплексных лесных предприятиях, расчетов на прочность покрытий из малосвязных материалов, надежности лесных дорог, транспортного процесса в комплексных лесных предприятиях, технико-экономического обоснования проектов лесных дорог, вводно-теплового режима земляного полотна лесовозно-хозяйственных дорог, движения поездов.

Баранов А.Н., 2012
Сибирский государственный
технологический университет, 2012

Содержание

Введение	7
1 Теоретические основы проектирования плана и продольного профиля лесовозных дорог.....	8
1.1 Особенности современной технологии изысканий лесовозных дорог.....	8
1.2 Учет местных условий при определении положения трассы дороги.....	9
1.3 Учет метеорологических условий при трассировании....	12
1.4 Расчеты элементов клотоидных масс магистральных путей.....	13
1.5 Разбивка переходных кривых по клотоиде.....	15
1.6 Применение способов полигонного трассирования и метода гибкой линейки.....	17
1.7 Автоматизированное проектирование плана трассы.....	19
1.8 Требования к проектной линии продольного профиля и способы ее назначения.....	21
1.9 Последовательность проектирования продольного профиля.....	23
1.10 Критерии оптимальности.....	27
1.11 Методы автоматизированного проектирования продольного профиля.....	29
1.12 Контрольные вопросы.....	31
2 Теоретические основы обоснования проектных параметров и норм проектирования лесных дорог.....	31
2.1 Обоснование числа полос движения на лесной дороге...	31
2.2 Условия применения лесных дорог с одной полосой движения.....	33
2.3 Обоснование ширины проезжей части и земляного полотна.....	35
2.4 Уширение проезжей части на кривых.....	37
2.5 Учет величины косого уклона и уклона отгона виража...	40
2.6 Проектирование серпантин.....	41
2.7 Контрольные вопросы.....	43
3 Вопросы теории водно-теплового режима земляного полотна лесовозно-хозяйственных дорог.....	43
3.1 Влияние природных факторов на состояние лесовозных дорог.....	43
3.2 Водный баланс земляного полотна.....	44
3.3 Типы водного режима грунтов.....	46
3.4 Водно-тепловой режим лесовозных дорог.....	46
3.5 Расчет зимнего влагонакопления.....	47
3.6 Требования к возвышению бровки земляного полотна над уровнем грунтовых вод.....	52
3.7 Методы определения расчетной влажности грунта	

земляного полотна.....	54
3.8 Регулирование водно-теплового режима.....	56
3.9 Способы регулирования водно-теплового режима.....	59
3.10 Расчет дренажа.....	59
3.11 Техничко-экономическое обоснование мероприятий по регулированию водно-теплового режима.....	62
3.12 Контрольные вопросы.....	64
4 Основы теории расчетов на прочность покрытий из малосвязных материалов.....	64
4.1 Основные особенности и свойства гравийных и щебеночных материалов.....	64
4.2 Основные теоретические предпосылки метода расчета на прочность дорожных покрытий из малопрочных каменных материалов.....	67
4.3 Основы метода расчета необходимой толщины покрытий из малосвязных каменных материалов.....	70
4.4 Контрольные вопросы.....	79
5 Основы теории размещения лесных дорог в комплексных лесных предприятиях.....	80
5.1 Основные требования и общая организация работы по размещению дорожной сети.....	80
5.2 Одноэтапные и многоэтапные методы размещения лесных дорог в КЛП.....	81
5.3 Основные системы размещения лесовозных и лесовозно-лесохозяйственных дорог.....	84
5.4 Выбор принципиальной схемы размещения лесовозных и лесовозно-лесохозяйственных дорог.....	88
5.5 Определение основных оценочных параметров систем размещения путей транспорта.....	92
5.6 Размещение в лесных массивах магистралей и веток лесовозных и лесовозно-лесохозяйственных дорог.....	97
5.7 Контрольные вопросы.....	103
6 Методы технико-экономического обоснования проектов лесных дорог.....	103
6.1 Способы обоснования принимаемых проектных решений.....	103
6.2 Учет влияния разновременности капитальных затрат и эксплуатационных расходов при сравнении вариантов...	104
6.3 Оптимизационные методы обоснования проектных решений.....	108
6.4 Определение удельных трудоемкости и энергетических затрат лесотранспортных операций.....	108
6.5 Контрольные вопросы.....	110
7 Основы теории движения лесовозных поездов.....	111
7.1 Основные задачи.....	111

7.2	Особенности движения и силы, действующие на лесовозный поезд.....	112
7.3	Силы сопротивления движению лесовозного поезда.....	114
7.4	Тормозные силы.....	118
7.5	Уравнение движения поезда и тягового баланса.....	119
7.6	Теоретические способы определения скоростей движения и времени хода поезда.....	120
7.7	Основы аналитического расчета.....	122
7.8	Основы графического метода интегрирования уравнения движения поезда.....	127
7.9	Понятие о численных методах интегрирования.....	129
7.10	Практические способы расчетов скоростей движения и времени хода поезда при проектировании лесных дорог	130
7.11	Особенности тяговых расчетов колесных транспортных систем высокой проходимости.....	132
7.12	Контрольные вопросы.....	134
8	Основы теории транспортного процесса в комплексных лесных предприятиях.....	134
8.1	Основные положения.....	135
8.2	Основные виды структур транспортного процесса в КЛП.....	136
8.3	Грузообразующие площади, их грузоотдача и определение годового объема вывозки лесного сырья по ЛЛД.....	139
8.4	Особенности транспортного процесса при освоении горных лесов.....	141
8.5	Сырьевые базы КЛП, их размеры и расчетный годовой объем вывозки лесного сырья.....	142
8.6	Расчетные скорости транспортных потоков на лесных дорогах, их оптимизация.....	144
8.7	Определение оптимальной ширины зон тяготения лесных грузов к лесовозно-хозяйственным дорогам.....	148
8.8	Применение веток и магистралей ЛЛД с переменной единичной стоимостью строительства.....	152
8.9	Выбор лесовозного подвижного состава для работы в КЛП.....	155
8.10	Контрольные вопросы.....	155
9	Основы теории надежности лесных дорог.....	156
9.1	Понятие надежности лесных дорог.....	156
9.2	Основы количественной оценки надежности лесных автомобильных дорог.....	157
9.3	Обеспечение требуемой надежности.....	163
9.4	Контрольные вопросы.....	169
10	Ключевые слова.....	169
11	Библиографический список.....	170

Транспорт в нашей жизни занимает одну из основных ролей. Особое значение транспорт имеет для добывающих отраслей, к которым относится лесная отрасль.

Транспорт в лесной отрасли занимает одну из трех фаз лесозаготовительного процесса. Затраты на создание дорожной сети и на подвижной состав за весь период освоения лесного массива предприятия составляет около 75% общих затрат.

Подготовка инженеров специальности 2601000 (280401) «Лесоинженерное дело» предполагает изучение таких дисциплин как «Транспорт леса», организация перевозок и управление транспортом с выполнением расчетных заданий и курсовых работ. Однако в этих дисциплинах основное внимание уделено проектированию дороги, организации строительства готового проекта дороги и решению транспортной проблемы по доставке лесного сырья от погрузочного пункта до потребителя.

«Теоретические основы проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных дорог» включает в себя дополнительные разделы по профилирующим дисциплинам, дает возможность углубления знаний по транспортной специализации до необходимого уровня, определяемого и современными требованиями.

Овладев знаниями теоретических основ лесоинженер способен принимать эффективные управленческие решения на всех этапах решения транспортного процесса.

Поэтому целью данного учебного пособия является углубление знаний в области проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных дорог и использования их в профессиональной деятельности.

Задачи, которые ставятся перед студентами при изучении курса, сводятся к тому, что совершенствуются навыки в принятии эффективных решений на всех этапах транспортного процесса и пути их эффективного применения.

Функции учебного пособия следующие: стимулирование познавательного интереса студентов к учебной дисциплине; закрепление знаний, умений и навыков, использование литературных источников; обобщение теоретических познаний; обеспечение работы студентов по индивидуальным заданиям; совершенствование творческого подхода к решению задач профессиональной деятельности; контроль и самоконтроль.

Учебной программой по дисциплине «Теоретические основы проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных дорог» для студентов специальности 260100 (250401) «Лесоинженерное дело» очной сокращенной формы обучения (3 курс) и заочной сокращенной формы обучения (5 курс) предусмотрено изучение данной дисциплины на протяжении одного семестра в объеме 140 часов.

Настоящее учебное пособие подготовлено в соответствии с перспективами развития лесной отрасли в условиях рыночной экономики и неистощительного лесопользования.

1 Теоретические основы проектирования плана и продольного профиля лесовозных дорог

1.1 Особенности современной технологии изысканий лесовозных дорог

Традиционная технология изысканий лесных дорог включает в подготовительный период сбор, обработку и изучение имеющихся картографических, лесосырьевых, инженерно-геологических, гидрологических и других материалов, составление схемы освоения лесного массива, трассирование по картам и выбор вариантов трассы.

В полевых условиях, как правило, по единственному выбранному на стадии предварительной камеральной обработки и уточненному рекогносцировками варианту выполняют сбор необходимой информации. При этом используют традиционное геодезическое и инженерно-геологическое оборудование и выполняют трассирование, разбивку пикетажа, закрепление трассы знаками, двойное нивелирование, съемку поперечников в сложных условиях, инженерно-геологическое обследование по оси трассы, разведку местных дорожно-строительных материалов, согласование с землепользователями и другими заинтересованными организациями и ведомствами. Информация при изысканиях лесных дорог собирается по узкой полосе шириной 50 м вдоль выбранного варианта трассы. Полученная таким образом информация не обеспечивает оптимального положения дороги в пространстве.

Развитие методов автоматизированного проектирования лесных дорог определяет необходимость сбора значительно большего объема информации для обеспечения возможности многовариантной проработки основных инженерных решений. Большой объем информации не может быть получен без увеличения сроков проектирования традиционными методами производства изыскательских работ с использованием морально устаревшего геодезического оборудования.

Современным методам автоматизированного проектирования лесных дорог соответствуют методы сбора информации с широким использованием аэроизысканий, наземной стереофотограмметрии и электронной тахеометрии.

Аэроизыскания представляют собой комплекс специальных воздушных, наземных, полевых и камеральных работ, направленных на получение исходной топогеодезической, инженерно-геологической, гидрогеологической, гидрологической и другой информации в пределах полосы варьирования трассы для разработки проекта дороги.

При переходе к автоматизированным методам проектирования методы аэрофотограмметрии становятся обязательными и наиболее важными

элементами технологии изысканий дорог:

Аэросъемочные работы выполняют для получения с самолета или вертолета изображений местности, используемых при выполнении комплекса стереофотограмметрических работ для получения исходной информации о местности. При изыскании лесных дорог наибольшее распространение имеет плановая аэросъемка, с помощью которой получают информацию о рельефе и ситуационных особенностях местности. Перспективная аэросъемка используется для воздушных обследований обычно при лесосырьевых изысканиях для оценки вписывания дороги в окружающий ландшафт, для решения экологических проблем. Для оценки почвенно-грунтовых и гидрогеологических условий проложения трассы и разведки местных дорожно-строительных материалов используется спектрозональная аэросъемка. Съёмки на двухцветной аэропленке передают в условных цветах особенности растительного покрова, влажности, типов почв и грунтов.

С помощью одних только аэрометодов невозможно собрать всю информацию для проектирования лесных дорог. Для обеспечения планово-высотной привязки аэросъемки, а также для геодезических работ по выносу трассы в натуру и проведения наземных изысканий в особых условиях или при неэффективности проведения аэросъемок применение современных наземных изысканий оказывается необходимым и оправданным.

Для проведения наземной стереофотограмметрии проводят фототеодолитную съемку с использованием фототеодолитов Photo-19/1318 и УМК -10/1318 с автоматизацией обработки результатов изысканий.

Для тахеометрических съемок, разбивочных работ, тригонометрического нивелирования и других наземных геодезических работ все более широко используются электронные тахеометры и электрооптические дальномеры с автоматической регистрацией результатов измерений в виде, пригодном для непосредственного ввода в ЭВМ.

1.2 Учет местных условий при определении положения трассы дороги

Трассирование лесовозной дороги является комплексной технико-экономической задачей, целью которой является проложение трассы так, чтобы обеспечить минимум суммарных расходов по вывозке древесины и строительству дороги, приходящихся на 1 м³ ликвидного запаса древесины в лесном массиве.

Изучая топографию, гидрографию и геологические условия в районе изысканий, намечают фиксированные точки на местности, определяющие положение трассы при обходе или пересечении контурных и высотных препятствий. К фиксированным точкам относятся также согласованные места пересечений автомобильных и железных дорог общего пользования, обходы

населенных пунктов, пересечения водотоков и т. п. Группируя опорные пункты и фиксированные точки в разных комбинациях, получают ряд вариантов направлений трасс, которые оцениваются по строительным и эксплуатационным показателям.

При нанесении каждого варианта трассы принимают во внимание следующие основные условия:

- учитывают требования технических нормативов (продольные уклоны, радиусы в плане, радиусы вертикальных кривых и т. д.);
- варианты дороги трассируют по возможности по кратчайшему направлению между заданными фиксированными пунктами;
- учитывают природные условия района проектирования;
- учитывают ситуационные особенности;
- рассматривают варианты пересечения водотоков, лощин, болот;
- рассматривают варианты обслуживания лесовозной дорогой лесных поселков, карьеров, проведения лесохозяйственных мероприятий.

Прямые, последовательно соединяющие опорные пункты называются воздушными линиями. Они определяют кратчайшее направление трассы автомобильной дороги. Как правило, многочисленные контурные и высотные препятствия приводят к отклонению трассы от кратчайшего направления.

На участках вольного хода изменения направления трассы определяются в основном расположением опорных точек и контурными препятствиями. Основные правила трассирования в этом случае следующие. Фиксированные точки располагаются против контурных препятствий и их количество определяется числом препятствий. Углы поворота без препятствий внутри являются необоснованными. Углы поворота определяются направлением линий, задаваемых от препятствия к препятствию, при этом препятствие должно остаться внутри угла. Для обеспечения минимальной длины дороги трасса должна укладываться с применением небольших углов поворота.

На участках напряженного хода, где уклоны местности превышают допустимый, возможны три решения плана трассы.

Проложение трассы по кратчайшему направлению со смягчением продольного уклона устройством выемок и насыпей с большими объемами земляных работ требует значительных капитальных затрат, но обеспечивает минимальные транспортно-эксплуатационные расходы и применимо только при проектировании лесовозных дорог высоких категорий с большим объемом вывозки.

Проложение трассы по склону с предельно допустимым уклоном позволяет запроектировать дорогу по огибающей с минимальными объемами земляных работ, но приводит к значительному удлинению трассы с соответствующим увеличением транспортно-эксплуатационных расходов. Такое решение оправданно при проектировании лесовозных и лесохозяйственных дорог с малыми объемами вывозки и невысокой перспективной интенсивностью движения.

При дополнительном развитии линии элементы трассы следует

располагать по возможности под углом $45 \dots 60^\circ$ к кратчайшему направлению. На поворотах трассы следует применять достаточно большие радиусы, не вызывающие дополнительного сопротивления движению. Положение трассы на плане в горизонталях отмечают последовательными засечками циркулем расстояний между смежными горизонталями, соответствующими продольному уклону, принятому при трассировании. Это расстояние – шаг трассирования – определяется по формуле

$$l = \frac{h10^6}{i_{mp}M}, \quad (1.1)$$

где h – сечение горизонталей, м; i_{tr} – уклон трассирования, ‰; M – знаменатель масштаба карты.

Положение линии заданного уклона находят, последовательно откладывая циркулем отрезок между горизонталями (рисунок 1.1). При этом максимально стремятся выдержать

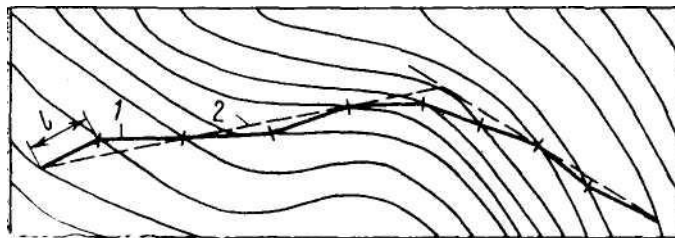


Рисунок 1.1 – Трассирование дороги заданным уклоном по плану в горизонталях. 1 – линия заданного уклона, 2 – спрямленная трасса

заранее намеченное направление трассы. Полученную ломаную линию спрямляют, вписывая в образующиеся углы круговые и переходные кривые, пользуясь для этого прозрачными шаблонами, или на ЭВМ, вводя в нее координаты засечек на горизонталях и используя программы для вписывания клотоид или сплайнов.

Минимально необходимое удлинение трассы на участках напряженного хода определяется по формуле

$$L = \frac{H - h_n + h_v}{i_{mp} - i_{эк}}, \quad (1.2)$$

где H – преодолеваемая разность высот, м; h_n , h_v – возможная высота насыпи в начале подъема и глубина выемки на перевале, м; $i_{эк}$ – уклон, эквивалентный дополнительному сопротивлению от кривой.

1.3 Учет метеорологических условий при трассировании

Из метеорологических условий при выборе трассы следует учитывать направление господствующих ветров в зимний период. В первую очередь это относится к участкам незалесенной местности (болота, вырубки).

В безветренную погоду снег ложится ровным слоем и при своевременной очистке проезжей части не представляет сложности для эксплуатации лесовозных дорог. При ветре более 3 ... 5 м/с снеговой покров сдувается и переносится в

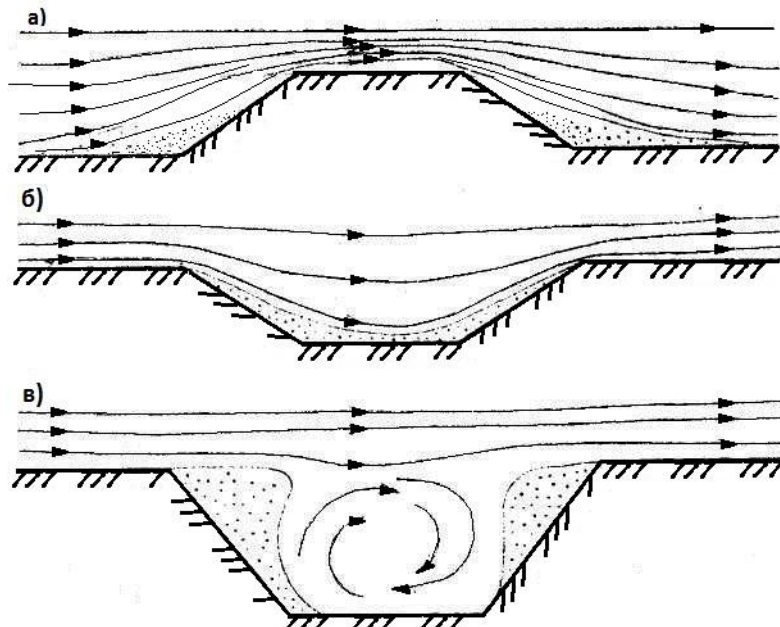


Рисунок 1.2 – Схема образования снеговых отложений: а) насыпь, б) мелкая выемка, в) глубокая выемка

приземном слое воздуха, образуя поземку, при этом до 90% снега перемещается в пределах 10 см у поверхности снеговых отложений. Если перенос снега происходит при снегопаде, возникает низовая метель. Когда на пути снегового потока встречаются препятствия, условия движения воздушных струй меняются. Если препятствие представляет собой понижение местности, воздушный поток расширяется, скорость его снижается, и часть снега выпадает, заполняя понижение. Этим объясняется сильная заносимость узких выемок, канав. Если препятствие представляет собой возвышение, то нижние слои потока воздуха, обтекая препятствие, должны пройти через меньшее сечение. При этом скорость потока возрастает и на поверхности возвышения снег не осаждается, а сдувается с большей силой, но в непосредственной близости от препятствия образуются зоны затишья, в которой откладывается значительная часть переносимого снега (рисунок 1.2). Если к дороге за зиму приносится меньше снега, чем может отложиться в пределах откосов насыпей или выемок, участок дороги можно считать незаносимым.

Количество снега, приносимого к дороге, зависит от объема

выпадающего снега, силы и направления ветра, площади, с которой снег может сметаться ветром, и от наличия препятствий, задерживающих снег. В лесных районах принимают, что к дороге может сноситься половина выпавшего снега. Количество выпадающего снега устанавливают по данным метеостанций или по картам среднегодовой высоты снегового покрова.

Максимальное количество снега, принесенного к дороге в м³ на метр дороги приближенно можно определить по зависимости

$$Q = khl - \sum g \sin \alpha, \quad (1.3)$$

где k – доля выпавшего снега, сносимого со снегосборного бассейна; h – среднегодовая толщина снежного покрова, м; l – длина снегосборного бассейна, м; $\sum g$ – количество снега, удерживаемого неровностями снегосборного бассейна, м³; α – угол между господствующими зимними ветрами, и направлением дороги, определяемый по розе ветров.

Характеристики участков дорог по снегозаносимости приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики участков дорог по снегозаносимости

Категория снегозаносимости участков дороги	Характеристика участка
Слабозаносимые	Насыпи высотой более толщины среднегодовой высоты снежного покрова, участки дорог, расположенные вдоль господствующих зимних ветров, участки дорог, расположенные в лесной просеке
Среднезаносимые	Насыпи высотой менее среднегодовой высоты снежного покрова, выемки с уположенными откосами
Сильнозаносимые	Глубокие выемки, выемки с крутыми откосами, полки на косогорах

1.4 Расчеты элементов клотоидных трасс магистральных путей

Для повышения производительности работы транспортных средств на магистральных путях лесовозных дорог необходимо обеспечить движение лесовозных автопоездов с большими скоростями. Для обеспечения безопасности движения при этом необходимо создать условия устойчивого движения на всех элементах дороги. В момент въезда автопоезда с прямого участка на кривую в плане условия движения изменяются. На автопоезд начинает действовать центробежная сила. Теоретически она возникает мгновенно, но практически – в пределах участка дороги, на котором водитель поворачивает рулевое колесо. Для того, чтобы обеспечить устойчивость груза, а при неблагоприятных погодных условиях не вызвать заноса

автопоезда, между прямым участком и круговой кривой малого радиуса устанавливается переходная кривая, в пределах которой кривизна дороги плавно меняется от нуля до величины $1/R$.

Для обеспечения безопасности и удобства движения примем, что режим изменения действующих на автопоезд сил и режим его движения удовлетворяют следующим требованиям.

1. Скорость движения автопоезда от начальной v_{np} снижается до скорости на кривой $v_{кр}$ прямо пропорционально продолжительности проезда с постоянным допустимым отрицательным ускорением:

$$\alpha = \frac{v_{np} - v_{кр}}{T} = \frac{v_{np} - v_{кр}}{2L} = \frac{v_{np}^2 - v_{кр}^2}{2L}, \quad (1.4)$$

где T – продолжительность проезда переходной кривой длиной L .

2. Центробежное ускорение возрастает прямо пропорционально продолжительности движения по переходной кривой:

$$\frac{v^2}{r} Jt, \quad (1.5)$$

где v – скорость движения автопоезда на участке переходной кривой радиусом r , расположенном на расстоянии l от ее начала, которое автопоезд проезжает за t с.

Параметр J определяем из уравнения (1.5), подставив в него значения для конца переходной кривой $v = v_{кр}$, $r = R$, $t = T$ и учитывая, что

$$T = \frac{2L}{v_{np} + v_{кр}}, \quad (1.6)$$

$$J = \frac{v_{np}^2}{2RL}, \quad (1.7)$$

Для любой точки переходной кривой, согласно (1.5),

$$\frac{v^2}{r} = Jt = \frac{J(v_{np} - v_{кр})}{\alpha}. \quad (1.8)$$

Подставляя в это уравнение α и J из (1.4) и (1.7), получим

$$r = \frac{v^2 (v_{np} - v_{кр}) R}{v_{кр}^2 (v_{np} - v_{кр})}. \quad (1.9)$$

Полученное уравнение называют тормозной кривой и она описывает движение автопоезда при въездах на кривые малых радиусов с торможением

или выезд с кривых с ускорением.

На магистральных лесовозных дорогах необходимо обеспечить движение автопоездов на кривых без снижения скорости движения. Приняв $v_{пр} = v_{кр}$, подставив в уравнение (1.9) и раскрыв неопределенность, получим выражение

$$r = \frac{RL}{l} = \frac{c}{l} \quad (1.10) \quad \text{или} \quad c = rl, \quad (1.11)$$

Это уравнение представляет собой уравнение клотоиды, наиболее часто применяемой для переходной кривой автомобильных дорог. Радиус кривизны клотоиды возрастает пропорционально ее длине. Длина переходной кривой назначается из условия, чтобы центробежная сила нарастала во время проезда кривой замедленно и не вызывала больших ускорений. Нормами проектирования дорог б. СССР принято значение $J = 0,5 - 0,8 \text{ м/с}^3$.

Продолжительность проезда переходной кривой, в течение которого центробежное ускорение равномерно возрастает от нуля до v^2/R , составляет $t = v^2/RJ$, отсюда необходимая длина переходной кривой (в м)

$$L = vt = \frac{v^3}{RJ}, \quad (1.12)$$

где v – расчетная скорость, м/с; R – радиус круговой кривой, м.

Если выразить скорость в км/ч, то

$$L = \frac{v^3}{47RJ}. \quad (1.13)$$

1.5 Разбивка переходных кривых по клотоиде

Уравнение клотоиды в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned} x &= l - \frac{l^5}{40c^2} + \frac{l^9}{3456c^4}, \\ y &= \frac{l^3}{6c} - \frac{l^7}{336c^3} + \frac{l^{11}}{42240c^5}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где $c = RL$; l – длина участка клотоидной кривой, соответствующего координатам x и y . Ряды x и y быстро сходятся и для практических расчетов